

ЗБІЛЬШЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ДО 13-РОЗРЯДНОГО АЦП ЗА ДОПОМОГОЮ ПРИНЦИПУ НОНІУСА НА ОСНОВІ ЦАП ІЗ ЧОТИРМА РЕЗИСТОРНИМИ ДІЛЬНИКАМИ НАПРУГИ З РІЗНИМИ ПОДІЛКАМИ, ЯКІ СКЛАДАЮТЬСЯ ІЗ 39 ОДНАКОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРЕЦИЗИЙНИХ РЕЗИСТОРІВ

Розглянуто види аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) та їх основні властивості. Детально описано можливість збільшення точності АЦП, що вміщує в собі цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) із чотирма резисторними дільниками напруги. Графічно зображено три стадії пошуку вхідної напруги. Для порівняння якісного показника описуваного АЦП і подібних до нього по принципу дії вводиться поняття коефіцієнту якості одного резистора. При цьому по коефіцієнту якості створено порівняльну таблицю ЦАП.

Ключові слова: АЦП, ЦАП, принцип ноніуса, коефіцієнт якості, резисторний дільник напруги, градації, шкала, розрядність АЦП, наближення, похибка, діапазон.

V.O. VARESHKO

Khmelnitskiy National University, Ukraine

INCREASING ACCURACY OF MEASUREMENTS UP TO 13-DIGIT ADC BY VERNIER SCALE PRINCIPLE BASED ON FOUR VOLTAGE RESISTIVE DIVIDERS' DAC WITH DIFFERENT DIVISIONS CONSISTING OF 39 IDENTICAL MEASURING PRECISION RESISTORS

There have been considered types of analog-to-digital converters (ADC) and their main characteristics. The possibility of increasing accuracy of ADC which contains digital-to-analog converter (DAC) with four voltage resistive dividers has been described in details. There have been graphically shown three phases of input voltage search. For comparing the described ADC quality indicator and similar ones by their operation principle, the notion of the resistor quality factor is introduced. Along with that, a comparing table of a few DAC has been created.

Keywords: ADC, DAC, vernier scale principle, quality factor, resistive voltage divider, gradations, scale, ADC resolution, approximation, error, range.

Вступ

Розрізняють дві форми подання інформації — аналогову (безперервну) і цифрову (переривисту). Аналогова форма подання інформації характеризує процес, який не має перерв і може змінюватися у будь-який момент часу і теоретично на будь-яку величину. Цифровий (дискретний) сигнал може змінюватися лише в певні моменти часу і набувати лише заздалегідь обумовлених значень [1].

Для перетворення аналогової величини в цифрову використовують аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), а для цифрової в аналогову — цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП).

На сьогоднішній день тенденція розвитку ЦАП і АЦП направлена на збільшення швидкості і роздільної здатності обробки сигналів при зменшенні рівня споживаної потужності і напруги живлення. Сучасні перетворювачі даних в основному працюють на напругах живлення $\pm 5V$ (двохполярне джерело живлення), $+5V$ або $+3V$ (однополярне джерело живлення). Кількість пристроїв із джерелом живлення на $+3V$ збільшується, оскільки відкриваються нові ринки збуту, такі як цифрові камери, відеоканери і мобільні телефони. Проте чим нижча енергоспоживність пристрою, тим більше він піддається різного роду перешкодам: шумам від джерел живлення, неякісним опорним і цифровим сигналам, електромагнітним впливам і радіоперешкод (EMI/RFI), чого не було так помітно у більш ранніх перетворювачах, які використовували стандартну напругу живлення $\pm 15V$ [2].

Аналіз першоджерел

Для аналізу першоджерел потрібно визначити сильні і слабкі сторони технічних характеристик існуючих апаратів. Саме тому АЦП умовно поділяються на найбільш швидкодіючі, АЦП з великою розрядністю та компромісні гібридні АЦП, які в певній мірі поєднують в собі високу швидкість та досить значну розрядність [3, 4, 5].

До найбільш швидкодіючих видів АЦП відносять паралельні аналого-цифрові перетворювачі. Ці види АЦП використовуються для передачі великих потоків даних. Тому вони передаються в паралельному вигляді. А це призводить до того, що вони мають велику кількість зовнішніх виходів. В результаті габарити мікросхем паралельних АЦП досить об'ємні. Ще однією особливістю паралельних АЦП є значне споживання струму. Ці недоліки є платою за високу швидкість перетворення даних. Швидкість перетворення в паралельних АЦП досягає 500 мільйонів відліків в секунду (500 MSPS). При цьому максимальна частота вхідного сигналу може досягати 250 МГц (за відомою теоремою Котельникова). Як приклад, можна назвати мікросхему AD6641-500 фірми Analog Devices або мікросхему ISLA214P50 фірми Intersil [6].

Максимальна тактова частота, що подається на вхід синхронізації паралельного АЦП, визначається

різницею поширення сигналів. При цьому слід звернути увагу, що при виготовленні компараторів на одному кристалі розкид їх параметрів, в тому числі і часу поширення сигналу з входу АЦП на його вихід, буде значно менше абсолютного значення часу затримки. При паралельному з'єднанні компараторів різниця поширення сигналів на їх виходах зазвичай не перевищує 10 пс. Тому максимальна тактова частота (вона ж максимальна частота дискретизації аналогового сигналу) досягає значення 500 МГц. Як приклад, можна назвати АЦП ADC08D1000 фірми National Products from Texas Instruments, AD9484 або AD9434 фірми Analog Devices [7].

Для досягнення ще більш високих швидкостей перетворення використовують паралельне з'єднання кількох паралельних АЦП, що працюють по черзі. При цьому для того, щоб забезпечити передачу даних до обробної мікросхеми, доводиться використовувати кілька паралельних шин (по одній на кожен АЦП) Серед подібного виду АЦП можна назвати мікросхему MAX109 фірми Maxim, що забезпечує швидкість перетворення до 2,2 GSPS.

Трохи більш економічним видом АЦП є послідовно-паралельні АЦП. У цих видах АЦП в процесі аналого-цифрового перетворення беруть участь ЦАП. Висока швидкість подачі на вихід відліків аналогового сигналу реалізується за рахунок конвеєрної обробки. В результаті для послідовно-паралельних АЦП швидкість перетворення і швидкість видачі на вихід чергового цифрового відліку не збігаються. Як приклад, можна назвати мікросхеми AD6645 і AD9430 фірми Analog Devices.

Найпоширенішим видом АЦП в даний час є АЦП послідовного наближення. Незважаючи на те, що в цих видах перетворювачів неможлива конвеєрна обробка даних (а, значить, час перетворення і період видачі даних на виході АЦП збігаються), даний вид АЦП володіє достатньою швидкістю для роботи в широкому діапазоні завдань [6].

Найвищою точністю перетворення на даний час — 24 двійкових розрядів — досягають сигма-дельта-АЦП. У цих перетворювачах для досягнення такої високої роздільної здатності суміщені досягнення як аналогової, так і цифрової техніки [2].

Постановка задачі

Загалом, задача полягає у зменшенні кількості подільних елементів для подільника Кельвіна, що є функціональним елементом як АЦП, так і ЦАП. Це дасть змогу завдяки певній архітектурі пристрою при однакових затратах резисторів і компараторів суттєво підвищити (у сотні разів) точність вимірювального приладу.

Для досягнення поставленої мети потрібно застосувати в ЦАП принцип ноніуса. При цьому, використовуючи паралельно декілька подільників Кельвіна через аналогові суматори напруги і подаючи на них певні коди, необхідно отримати гібридну шкалу, що за точністю в рази перевищує кожен з подільників і навіть їх сумарну можливість.

Підвищення точності шкали АЦП, створеної із чотирьох шкал з різними градаціями

Якщо розглянути АЦП, які в своїй архітектурі вміщують ЦАП, то можна побачити, що вони поступаються в швидкості паралельним перетворювачам. Проте їх роздільна здатність набагато вища. Уповільнення процесу перетворення в таких архітектурах перш за все залежить від їх складності та методу визначення шуканого значення. В процесі перетворення задіюються складні схеми, які синхронізуються із роботою вбудованого ЦАП. До того ж визначення потрібного значення ітераційними процесами завжди займають значну частину часу перетворення, на відміну від паралельних АЦП, які видають результат майже миттєво. Тому доцільніше використовувати в "непаралельних" АЦП основні засади і принципи паралельних АЦП, вдосконалюючи і спрощуючи, де це можливо, схеми перетворювачів.

Застосовувавши принцип ноніуса, який обумовлює існування декількох шкал з різними градаціями, можна вивести метод, що дає збільшення розрядності шкали для перетворювачів, використовуючи меншу кількість резисторів [8] (але і жертвуючи часом, затраченим на перетворення).

Для створення 13-розрядного АЦП на основі ЦАП, який працює по принципу ноніуса, потрібно чотири резисторні дільники напруги (РДН). У кожному дільнику знаходиться різна кількість резисторів при однаковій опорній напрузі U_{on} . Це дасть можливість отримати кількість різних градацій вхідної напруги, приблизно рівну кількості усіх резисторів, які знаходяться в чотирьох дільниках напруги із урахуванням повторюваних мінімального (нуля) та максимального (рівного опорній напрузі) значень. Кожен дільник побудований на основі матриці ланцюга послідовних резисторів. РДН утворюють дві пари, значення яких по чергово віднімаються одне від одного аналоговим суматором. Для дослідного прототипу планується брати дільники із 13 і 7 та 10 і 9 резисторами відповідно. Такі комбінації дають $13 \cdot 7 = 91$ та $10 \cdot 9 = 90$ градацій. Вони в свою чергу сформують шкалу із $90 \cdot 91 = 8190$ градацій. Тут сума використаних резисторів рівна $13+7+10+9 = 39$. Оскільки в звичайному паралельному АЦП (Flash АЦП) кількість резисторів відповідала кількості поділок на шкалі, а для даного прототипу кількість резисторів набагато менша за кількість поділок, то було прийнято рішення ввести поняття *коєфіцієнту якості одного резистора*. Він відображає кількість градацій відносно одного резистора і розраховується за формулою

$$\lambda(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) = \frac{\prod_{i=1}^n Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i}, \quad (1)$$

де Q_i — кількість резисторів в i -му РДН, n — кількість РДН в ЦАП.

Іншими словами, коефіцієнт якості одного резистора визначається відношенням кількості поділок шкали АЦП до кількості використаних резисторів. Застосувавши (1) для майбутнього прототипу, одержано:

$$\lambda(7,9,10,13) = \frac{8190}{39} = 210. \text{ Тобто один резистор із будь-якого РДН визначає 210 поділок шкали. Проте це не}$$

означає, що якщо один з резисторів вийде з ладу, то кількість градацій зменшиться на 210 в силу особливості побудови такої шкали.

Потрібно пам'ятати, що для вибору кількості резисторів в РДН існує правило, де $\{R_i\}_{i=1}^4$ повинні бути взаємно простими, оскільки одиниця квантування прямо залежить від найбільшого спільного дільника кількості резисторів у кожному РДН [8].

В ході побудови такої шкали можна відмітити три стадії отримання діапазонів, в яких знаходиться шукане значення. Кожен діапазон стискає окіл вхідного шуканого значення до максимально можливого, визначеного розрядністю АЦП. Значення шкали першого наближення та його похибка для 13-розрядного АЦП наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Шкала та похибка першого наближення

№	Шкала першого наближення	Похибка першого наближення
0	0	
1	0,076923	0,076923
2	0,1	0,023077
3	0,111111	0,011111
4	0,142857	0,031746
5	0,153846	0,010989
6	0,2	0,046154
7	0,222222	0,022222
8	0,230769	0,008547
9	0,285714	0,054945
10	0,3	0,014286
11	0,307692	0,007692
12	0,333333	0,025641
13	0,384615	0,051282
14	0,4	0,015385
15	0,428571	0,028571
16	0,444444	0,015873
17	0,461538	0,017094
18	0,5	0,038462
19	0,538462	0,038462
20	0,555556	0,017094
21	0,571429	0,015873
22	0,6	0,028571
23	0,615385	0,015385
24	0,666667	0,051282
25	0,692308	0,025641
26	0,7	0,007692
27	0,714286	0,014286
28	0,769231	0,054945
29	0,777778	0,008547
30	0,8	0,022222
31	0,846154	0,046154
32	0,857143	0,010989
33	0,888889	0,031746
34	0,9	0,011111
35	0,923077	0,023077
36	1	0,076923

Вектор значень першого наближення утворює своєрідну шкалу (рис. 1), яка не має визначеної одиниці квантування, оскільки вона утворена зі значень, які видають чотири резисторних ділянки, що відображаються у порядку зростання. Таким чином, сусідні значення шкали необов'язково будуть з одного РДН.

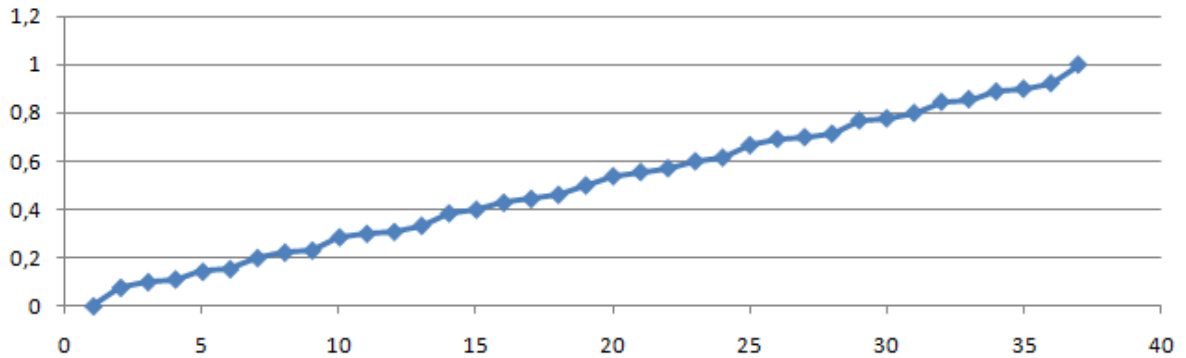


Рис. 1. Шкала першого наближення

Оскільки в такій шкалі градації розміщені нерівномірно, то й похибка такої шкали буде коливатись в залежності від локації. На рис. 2 зображено похибку першого наближення.

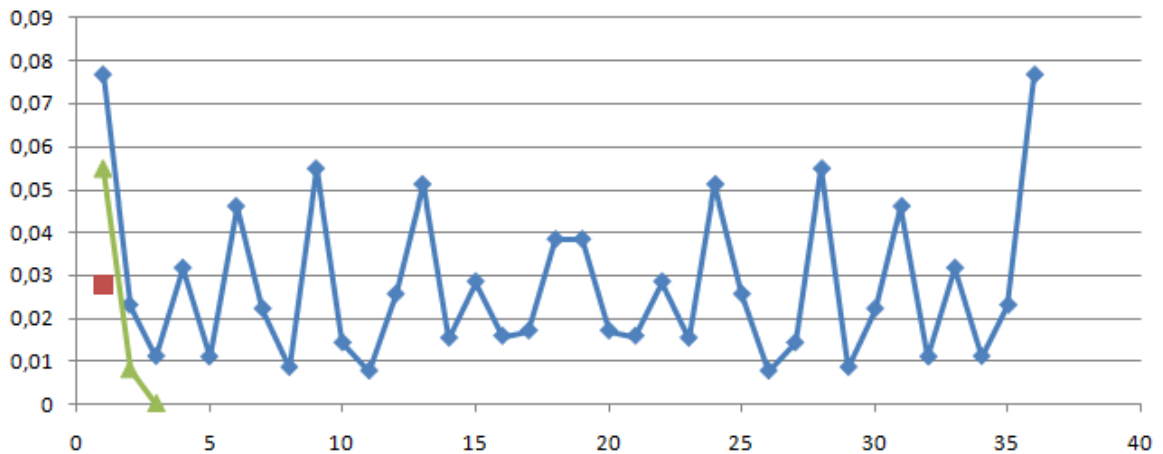


Рис. 2. Похибка першого наближення, що відображає діапазони, в яких може перебувати шукане вхідне значення

Планується, що АЦП спершу миттєво визначатиме таким чином певну ділянку, в яку попадає вхідна напруга, а наступним кроком буде ітераційний процес визначення напруги уже з цієї ділянки. Оскільки формується 36 таких ділянок і вони займатимуть від 7,7 % до 0,77 % (похибка шкали АЦП складатиме близько 0,012 %) від усієї шкали, то очевидно, що це зменшить час пошуку.

Наступний вектор значень буде отриманий від різниці значень ділянок із 13 і 7 резисторів та ділянок із 10 і 9 резисторів. Цей вектор складатиметься і 91 та 90 значень відповідно, що в сумі міститиме 181 неповторюваних значень (рис. 3) та 180 локацій (рис. 4). Проте це — проміжні значення й у визначенні вхідного значення прямої участі вони не беруть. Але вони є “будівельними” елементами третього наближення.

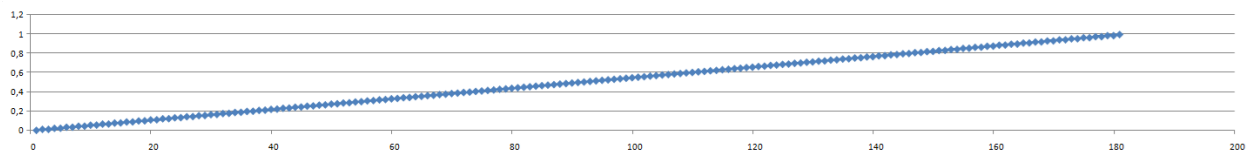


Рис. 3. Шкала другого наближення та проміжні значення, які у визначенні вхідної напруги прямої участі не беруть

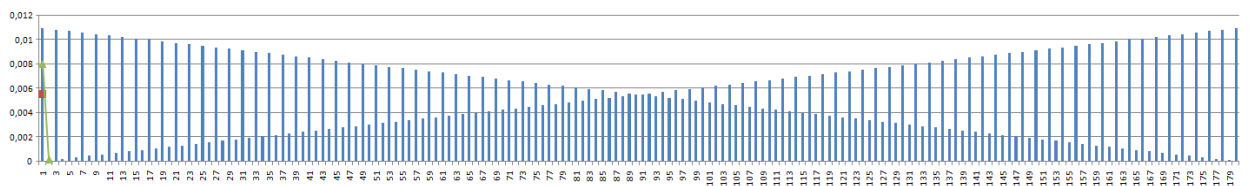


Рис. 4. Похибка другого наближення

Після того, як отримали значення з двох пар РДН, аналогічним чином можна побудувати вектор

третього наближення. Утворивши матрицю різниць із 91 та 90 значень, отримуємо $91 \cdot 90 = 8190$ градацій для вимірювального пристрою, який використовує всього лиш 39 резисторів (рис. 5). ЦАП, який використовується в даному типі АЦП, по суті є модифікованим ЦАП з сумуванням напруг. Паралельно працюючи на 7, 9, 10 та на 13 градацій ЦАПі при правильній подачі кодів на ключі сумарно можуть покращити точність такого перетворювача в 210 разів, порівняно з ЦАП, що працює на тій же кількості (тобто 39) резисторів.

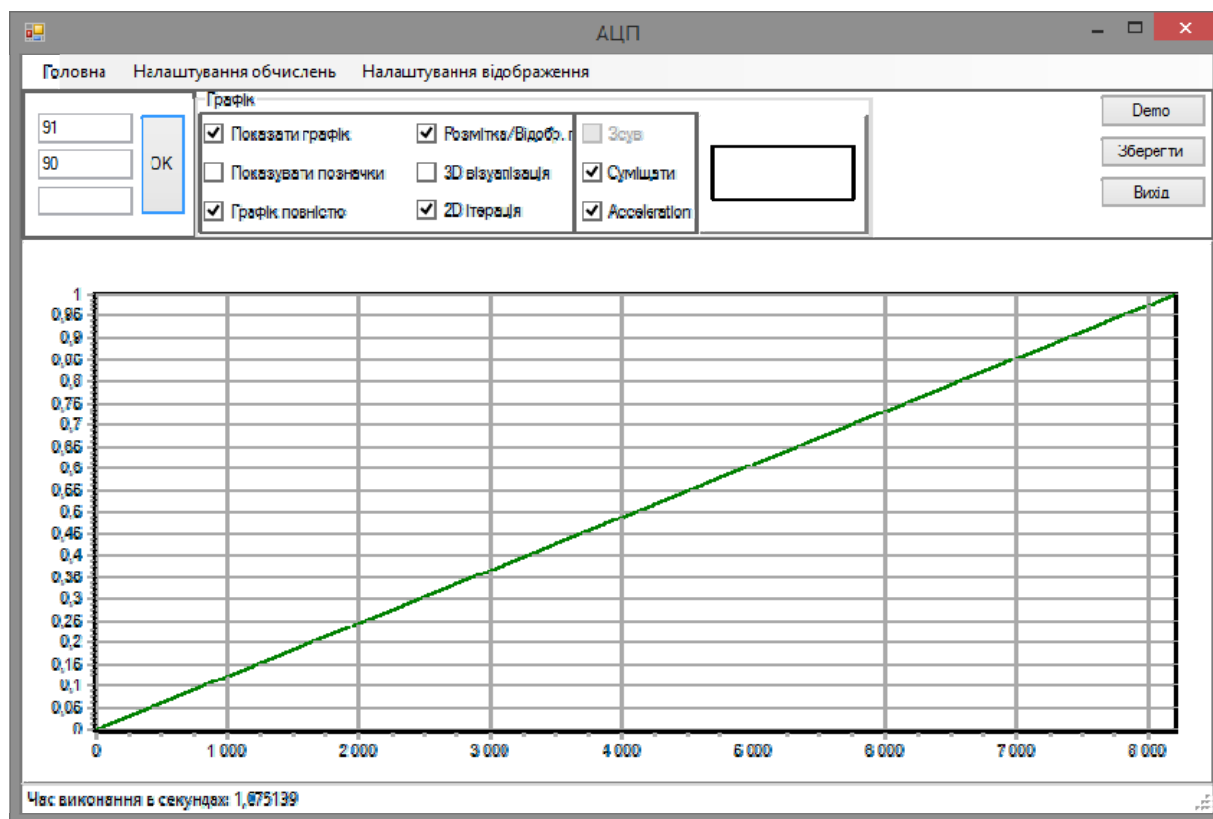


Рис. 5. Шкала третього наближення (завершальна, остаточна шкала) з одиницею квантування $1/8190$

Переваги використання такого АЦП на основі ЦАП, що працює по принципу ноніуса, очевидні, і вони відображені у порівняльній таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльна таблиця ЦАП на основі подільника Кельвіна та ЦАП з чотирма РДН, які працюють по принципу ноніуса

ЦАП на основі подільника Кельвіна			ЦАП з 4 РДН		
Кількість резисторів	Одиниця квантування	Коефіцієнт якості одного резистора λ	Кількість резисторів	Одиниця квантування	Коефіцієнт якості одного резистора λ
32	1/32	$32/32=1$	39 (13x7X10x9)	1/8190	$8190/39=210$
64	1/64	$64/64=1$			
128	1/128	$128/128=1$			
256	1/256	$256/256=1$			

Висновок

У даній статті наведений приклад, в якому описується принцип дії АЦП із вбудованим ЦАП, що дозволяє значно пришвидшити роботу і збільшивши розрядність перетворювача, зменшивши при цьому кількість елементів вимірювання. Планується, що даний АЦП працюватиме в два етапи: на першому етапі він працює як звичайний Flash АЦП, визначаючи при цьому діапазон, в якому знаходиться шукана вхідна напруга. На другому етапі за допомогою модернізованого ЦАП, який працює за принципом ноніуса, даний АЦП визначає вхідну напругу з точністю до 0,012 % усієї шкали. Очевидною перевагою такого способу є економія на кількості резисторів і зменшення діапазону пошуку вхідної напруги, що уже пришвидшує саму роботу АЦП.

Література

1. Онанченко Є. Л. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт “Дослідження роботи ЦАП і АЦП” з дисципліни “Електронні системи” / Є. Л. Онанченко, І. Є. Бражник. — Суми : Сумський державний університет, 2012. — 30 с.
2. Аналого-цифровий перетворювач [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://digteh.ru/LIB/Kester/03.pdf>
3. Kester W. Analod-Digital Conversion / W. Kester. — Analog Devices, Inc., USA, 2004. — 1138 p.
4. Kester W. Mixed-Signal and DSP Design Techniques / W. Kester. — Analog Devices, 2004. — 424 p.
5. Kester W. High Speed System Application / Walt Kester. — Analog Devices, 2006. — 360 p.
6. Виды аналого-цифровых преобразователей [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://digteh.ru/dsp/ADC/>
7. Федорков Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б. Г. Федорков, В. А. Телец. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 320 с.
8. Варешко В. О. Повна лінійна шкала для вимірювальних перетворювачів інформації із використанням двох допоміжних шкал з різними одиницями квантування / В. О. Варешко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. — 2014. — № 5. — С. 100 — 109.

References

1. Onanchenko Y. L., Brazhnyk I. Y. Methodical instructions for laboratory works “Investigation of DAC and ADC” in discipline “Electronic Systems”, Sumy, Sumsky State University, 2012, 30 p.
2. <http://digteh.ru/LIB/Kester/03.pdf>
3. Kester W. Analod-Digital Conversion, Analog Devises, Inc., USA, 2004, 1138 p.
4. Kester W. Mixed-Signal and DSP Design Techniques, Analog Devises, 2004, 424 p.
5. Kester W. High Speed System Application, Analog Devises, 2006, 360 p.
6. <http://digteh.ru/dsp/ADC/>
7. Fedorkov B. G. Microchips DAC and ADC: functioning, parameters, application, Moscow, Vyshcha shkola, 1990, 320 p.
8. Vareszko V. O. Complete linear scale for information measuring converter by using two supplementary scales with different quantization units, Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences, 2014, N. 5, pp. 100 — 109.

Рецензія/Peer review : 12.12.2014 р.

Надрукована/Printed : 14.1.2015 р.